

Mikrohullámú ferritek és ferrites eszközök kutatása, fejlesztése

DR. MARKÓ SZILÁRD

Távközlési Kutató Intézet



ÖSSZEFOGLALÁS

A korszerű mikrohullámú rendszerek és berendezések számára nélkülözhetetlen passzív, nonreciprok ferrites eszközök (izolátorok, cirkulátorok, giromágneses (YIG) szűrők stb.) valamint a mikrohullámú ferritanyagok és ezek mérései területén Magyarországon, a Távközlési Kutató Intézetben folyó kutató-fejlesztő tevékenységről, ennek rövid történetéről, fontosabb eredményeiről és jövő elképzeléseiről számol be röviden a cikk.

Bevezetés

Korszerű mikrohullámú rendszerek, berendezések nem nélkülözhetik a passzív, nonreciprok ferrites eszközöket: izolátorokat, cirkulátorokat, nonreciprok fázistolókat, giromágneses (YIG) szűrőket stb.

A mikrohullámú teljesítményt csak az egyik irányban átengedő, a másik irányban haladót elnyelő izolátort a káros reflexiók elnyelésére, fokozatok illesztésére használják.

A cirkulátorokat, amelyek az egyes kapuba belépő teljesítményt, jelet csak egy adott sorrendben következő kapun engedik kijutni (pl. egy háromkapus cirkulátor esetén az 1. kapuból a 2. kapun, a 2.-ból a 3.-on — a 3.-ból pedig a 1.-on jut ki a teljesítmény) széles körben használják egy antennán történő adás-vételkor az adó és vevő szétválasztására, egy-kapus, reflexiós erősítők (parametrikus, alagút-diódás stb. erősítők) esetében a bemenet és a kimenet szétválasztására, csatorna szétválasztó szűrőváltók esetében stb.

A nonreciprok fázistolókkal (nagyteljesítményű) cirkulátorokat és izolátorokat lehet építeni. A vezérelhető fázistoló elrendezésekkel radar antennák nyalábjá irányát lehet változtatni stb.

A giromágneses szűrők külső mágneses térrel (árammal) széles, több oktávós frekvenciasávban hangolhatók, így nélkülözhetetlen elemei a panoráma vevőknek, hangolható oszcillátoroknak, vobulátoroknak.

Ilyen passzív, nonreciprok eszközök készítéséhez olyan közegre van szükség, amelynek valamelyik elektromágneses közegjellemzője: permeabilitása, permittivitása vagy vezetése nemszimmetrikus tenzorral rendelkezik [1], [2].

A mágneses anyagoknál polarizáló állandó mágneses tér hatására létrejövő giromágneses jelenség teszi a közeget anizotroppá, hozza létre a közeg aszimmetrikus permeabilitás tenzorát.

A vezető (fémes) mágneses anyagok esetében a nagyfrekvenciás elektromágneses tér csak a skin-mély-

DR. MARKÓ SZILÁRD

A BME Villamosmérnöki Karán szerzett villamosmérnöki oklevelet 1957-ben. 1978-ban nyerte el a műszaki tudományok kandidátusa fokozatot. 1980-ban Állami Díjjal tüntették ki. 1957 óta a Távközlési Kutató Intézetben dolgozik, jelenleg tu-

dományos főmérnöki beosztásban. Fő szakmai tevékenységét a giromágneses nonreciprok eszközök kutatás-fejlesztése területén fejtette ki. Tagja a HTE-nek, az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak, valamint a Nemzetközi Mikrohullámú Ferrit Konferencia Nemzetközi Rendezőbizottságának.

ségig (ami a mikrohullámok esetén néhány tized mikrométer) hatol be az anyagba, és így nem alakulhat ki számottevő giromágneses kölcsönhatás. A giromágneses hatás kihasználásának feltétele tehát, hogy a mágneses közeg jó, kisvesztésű szigetelő anyag legyen. Ilyen anyagok a ferrimágneses oxidok, a ferritek.

A ferritek esetében kettő (vagy több) mágneses alrendszer van egymással antiferromágneses kölcsönhatásban (az erős szuperkicserélődési kölcsönhatásban levő alrendszerek anti-parallel helyzetbe állítják egymás mágneses momentumait), így az eredő mágnesességet a két alrendszer mágneszettsége különbsége (több alrendszer esetén általában algebrai összege) adja.

A ferritek mikrohullámú alkalmazása lényegesen magasabb követelményeket támaszt az anyagparaméterekkel szemben. A fajlagos ellenállás nagyságrendekkel nagyobb kell, hogy legyen (nagyobb mint 10^9 ohm cm), mint a közönséges hangfrekvenciás vagy rádiófrekvenciás ferritek esetében. A mágneses veszteségekre, anizotrópia állandókra is különlegesen szigorú feltételek adódnak.

Ezért a passzív, nonreciprok ferrites eszközökhöz speciális mikrohullámú ferritanyagokat kellett kifejleszteni.

A továbbiakban a Távközlési Kutató Intézetben — az intézet által fejlesztett rendszerekhez szükséges — mikrohullámú ferritek és ferrites eszközök kutatása, fejlesztése terén elért eredményeket fogjuk röviden ismertetni, a teljességre való törekvés helyett, az érdekesebbnek, jelentősebbnek ítélt eredmények közül a kutató, fejlesztő munka sokoldalúságáról képet adó, jellemző példák kiragadásával.

Mikrohullámú ferritanyagok kutatása, fejlesztése

Intézetünkben ipari célú, eszközkonceptiójú anyagkutatás folyik. Széles anyagválaszték helyett, adott eszközök számára kívánunk speciális anyagokat kifejleszteni.

A mágneses anyagkutatás intézetünk alapításának az első éveiben megkezdődött. Első eredményünk a hazai porvasmag előállításának megoldása volt.

A ferritkutatás első feladata nagy kezdőpermeabilitású ferritek kidolgozása és iparosítása volt. 1100, 2000 és 3000 kezdőpermeabilitású átviteltechnikai ferriteket dolgoztunk ki, és ezek gyártását a váci HAGY-ban üzemeltettük.

A Vilati és Telefongyár igényeihez néhány négyszög-hiszterézis hurkú ferrittípust is kidolgoztunk, melyeket nagyberendezéseikbe építettek be.

1957 után fő feladatunk a TKI-ban kifejlesztett mikrohullámú nagyberendezésekhez szükséges ferrimágnes anyagok kidolgozása lett.

Az intézetünkben kifejlesztett mikrohullámú ferrites eszközökhöz szükséges ferrittípusok közül azok készítését, amelyeket nagyobb mennyiségben használnak fel, szintén üzemeltettük a HAGY-ban, a kisebb mennyiségben igényelt és kényesebb típusokat laboratóriumunkban állítjuk elő.

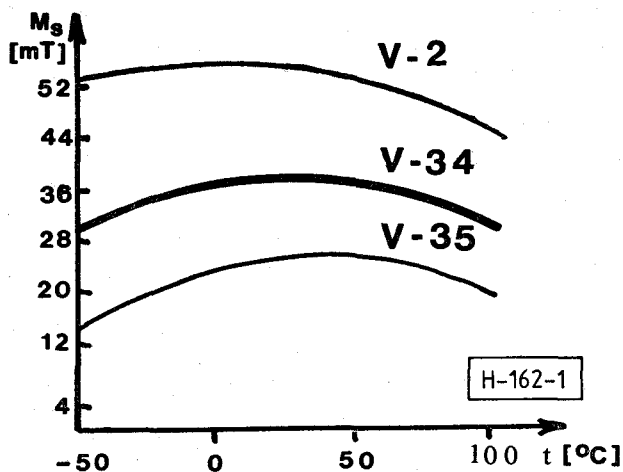
Kezdetben spinell struktúrájú mikrohullámú ferriteket fejlesztettünk, de ma már eszközeink többségében a kisebb dielektromos veszteségeket adó és hőfokfüggés kompenzációt lehetővé tevő, három mágneses alrendszert tartalmazó gránát struktúrájú ferriteket — röviden gránátokat — alkalmazunk.

Polikristályos gránát anyagból 17 típust dolgoztunk ki és állítunk elő folyamatosan laboratóriumunkban, az igényeknek megfelelően. Ezek telítési mágnesszéttsége 25...175 mT (250...1750 G) közötti. Egyes típusokra jellemző a munka-hőmérséklettartományban való hőmérsékleti függetlenség, más típusok alacsony mágneses és dielektromos veszteségeikkel tűnnek ki.

Illusztrációul bemutatjuk az utóbbi években kifejlesztett néhány alacsony telítési mágnesszéttséggű és kis hőmérsékletfüggésű gránátanyag M_s/T görbét. Lásd az 1. ábrát.

Külön indokolt megemlíteni a mikrohullámú áramkörök alaplemezeként kifejlesztett gránát típusainkat, amelyeknél a megfelelő mágneses és elektromos tulajdonságok mellett fontos követelmény a nagyfokú felületi tömörség és homogenitás is.

A kialakított gránátanyag homogenitását az előállítás minden lépése befolyásolja. Laboratóriumi



1. ábra. Különböző gránátanyagok telítési mágnesszéttsége hőfokfüggése

kísérletsorozat alapján megállapítottuk, hogy az előszinterelt anyagban nemcsak a mechanikai inhomogenitás játszhat szerepet, hanem a kémiai inhomogenitás, vagyis az egyes kristályszemcsék eltérő kémiai összetétele is. Az egymással különböző arányban jól ötvözhető spinelleknél az inhomogenitás előnyös a nagyobb reakciókészség miatt, míg a gránátoknál lehetetlenné teszi a kész, zsugorított anyag megfelelő homogenitását. [3]

Ferrimágneses egykristályok előállítására vonatkozó kísérleteink eredménye 1750—200 G közötti, Ga és Sc ionokkal szubsztituált ittrium-gránát és CaVaBi gránát egykristályok előállítása. Ezek világszínvonalú minősége megfelel a TKI-ban kifejlesztett mikrohullámú szűrők és oszcillátorok követelményeinek.

Az egykristályok növekedésének lefolyását azok oldódási formáinak vizsgálatával követtük nyomon.

Az anyaggal szemben támasztott egyre növekvő követelmények szükségessé tették az alapkutatás jellegű munkát is.

Új vizsgálati módszert dolgoztunk ki (a BME-vel közösen) a mágneses térben működtetett differenciál-thermo-gravimetriát (DTGM), amely eddig alkalmazott méréseknél lényegesen érzékenyebb a mágneses fázisok kimutatására. [4]

E vizsgálati módszer eredményeit együtt értékelve röntgensugaras és infravörös spektroszkópiai megfigyelésekkel, az $Y_2O_3-Fe_2O_3$ gránátképződési reakció részletes menetének leírásához is hozzá tudunk járulni. [5]

Kísérleteink során megállapítottuk, hogy a polikristályos giromágneses anyagok vesztesége nem csupán a kémiai összetételtől és a morfológiai tényezőktől (sűrűség, kristályszemcseméret, homogenitás) függ, hanem lényeges befolyást gyakorol a vas-ion tartalomnak igen kis mértékű változása a stöchiometrikus összetétel közelében. Kimutattuk, hogy adott összetételű gránátanyagnál a ΔH értékének maximuma meghatározott kristályrácsállandó és kristályszemcse nagyságával, ill. ezekhez rendelhető vas-ion tartalommal valósítható meg.

A vas-ion tartalom extrém kis különbségét viszont igen nehéz kémiai analízissel követni vagy a minták rácsállandóit vagy pontos szemcseszerkezetét mérni. A Néel pont meghatározása DTG(M) módszerrel, kombinálva egy egyszerű, fénymikroszkópos homogenitás vizsgálattal, alkalmas a vas-ion tartalom kis különbségeinek regisztrálására.

Így az optimális vastartalom — melyet egyrészt a kívánt mágneses tulajdonságok, másrészt az előállítási technológiai lehetőségek szabnak meg — regisztrálása lehetővé válik. [6]

A magasabb követelményeket mind többféle szubsztituens beépítésével lehet elérni. A sok komponensű anyagok szilárd fázisú előállítása viszont szükségessé tette az intermedier termékek keletkezési és átalakulási körülményeinek ismeretét.

Reakciókinetikai vizsgálataink során megfigyeltük, hogy a szereplő ionok arányának megváltoztatása milyen új, átmeneti termékek keletkezésével jár, és kimértük ezen intermedierek stabilitási tartományát. Ezek az eredmények — amelyeket az utóbbi években elsősorban az egymást követő Nemzetközi Mikrohullámú Ferrit Konferenciákon adtunk elő — teszik

lehetővé az előállítási technológia finomítását, a kívánt összetételű, homogén szerkezetű anyag készítését.

Mikrohullámú nonreciprok ferrites eszközök kutatása, fejlesztése

A mikrohullámú ferrites eszközök kutatása a TKI-ban 1957-ben kezdődött, csak pár évvel később mint a legfejlettebb országokban.

Az eszköz-fejlesztés gyakorlatilag párhuzamosan történt az anyagfejlesztéssel, nagy hangsúlyt fektetve az anyagok gyors minősítő módszerei egyidejű kifejlesztésére.

E kettős célt kezdetben a legjobban a Faraday-forgatásos csőtápvonalas elrendezések szolgálták. Így az első megvalósított csőtápvonalas izolátor és cirkulátor elrendezések Faraday-forgatóval készültek. A praktikus célra készülő csőtápvonalas izolátorok és cirkulátorok terén azonban a nagyméretű és komplikált felépítésű Faraday forgatásos eszközöket hamar kiszorították az egyéb elven működők.

A kisteljesítményű, távközlési célú csőtápvonalas izolátorok területén sokáig versenyben volt a rezonancia abszorpciós és a mezőtörzítési elven működő konstrukció. Kezdetben az utóbbi illesztési problémái miatt a rezonanciás izolátor került előtérbe, majd a mezőtörzítési izolátoroknál a világ legjobb műszaki adatait is túlszárnyalva, ez utóbbi véglegesen diadalmaszkodott.

A csőtápvonal keresztmetszetének nagy hányadát kitöltő ferrittestet tartalmazó mezőtörzítési izolátor elrendezés jól közelítő számítására sikerrel alkalmaztuk a variációs számítás technikáját egy új, mágnesesen anizotróp közegek esetén is érvényes, vektor variációs formula származtatásával. [10] Ma már évente több ezer mezőtörzítési izolátort készítünk a 3...26 GHz-es frekvencia tartományban, 0,2...0,5 dB-es át-

eresztőirányú, 20...30 dB-es záróirányú csillapítással, 1,02...1,05-os feszültség állóhullámaránnyal (FÁHA-nyal).

A cirkulátor megvalósítások között nálunk is — mint mindenütt a világon — uralkodóvá váltak a három hullámvezető „Y” találkozásában elhelyezett giromágneses testet tartalmazó háromkapus csomóponti cirkulátorok.

A csőtápvonalas csomóponti cirkulátorok zavaró felsőbb módusainak kiküszöbölésében jelentős gyakorlati eredmény volt a módusok elméleti vizsgálata alapján kialakított — a „H”-síkból, a ferrit formatest közepén vékony fémlemezt tartalmazó — konstrukció megvalósítása. [7] (Lásd a 2. ábrát.)

A csőtápvonalas cirkulátorokat is nagy mennyiségben készítjük a magyar mikrohullámtechnikai ipar maradéktalan ellátására 0,1...0,5 dB-os átteresztőirányú 20...35 dB-es záróirányú csillapítással és 1,04...1,2-es FÁHA-nyal.

Napjainkban a kutatási, fejlesztési tevékenység súlypontja a korszerű hibrid integrált áramkörös felépítésű rendszerekben alkalmazható, vékonyréteg technológiával megvalósított mikroszalag-vonalas cirkulátorok és izolátorok kialakítására helyeződött.

Ezek közelítő tervezéséhez Bosma szalagtápvonalas cirkulátorok számítására levezetett formulái jó kiindulási alapot nyújtanak. Az adott frekvencián a ferritárca-rezonátor R sugarára pl. a következő formulát adta

$$R = \frac{1,84}{\omega \sqrt{\mu_0 \mu_{eff} \epsilon_0 \epsilon_f}} \quad (1)$$

ahol ω a körfrekvencia, μ_0 és ϵ_0 a vákuum permeabilitása, ill. permittivitása, ϵ_f a ferritanyag relatív permittivitása

$$\mu_{eff} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu} \quad (2)$$

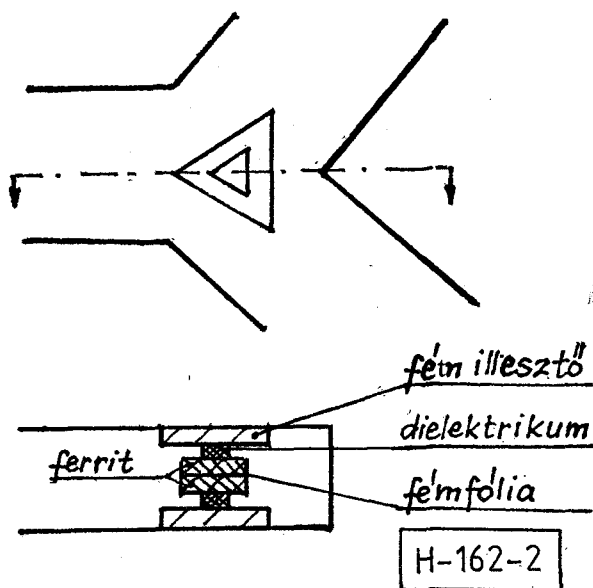
ahol μ és κ a permeabilitás tenzor elemei. [1], [2]

E formulák azonban nem veszik figyelembe a — főleg a mikroszalagvonalas elrendezéseknél jelentős — szórt terek hatását, és a csatoló vonalak hatását igen durván közelítik.

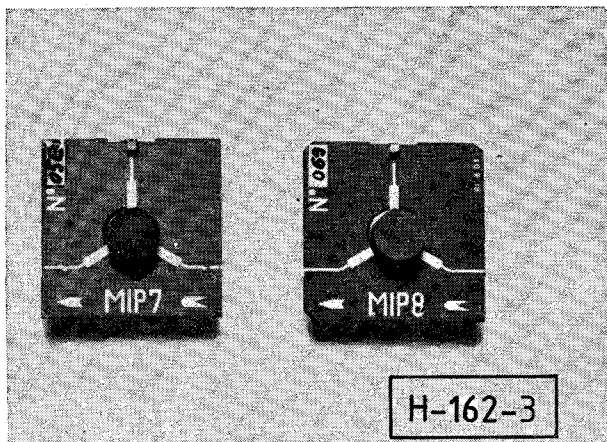
Ezen hátrányok kiküszöbölésére a számítások pontosabbá tételére ismét a variációs technikát alkalmaztuk, és a mérési eredményekkel nagyon jó egyezést mutató tervezési egyenleteket, eljárást kaptunk. [8]

A kisebb frekvenciákon (1—2 GHz alatt) működő koaxiális eszközök megvalósítása esetén — (1) egyenletből láthatóan — túl nagy ferritárca átmérő adódik, és ezért az eszközök kényelmetlenül nagyok lesznek. Ezért az elosztott paraméterű megoldás helyett koncentrált paraméteres kivitel célszerű alkalmazni. Ennek megvalósítása viszont, pont a nagyobb frekvenciákon (2 GHz felett) növekvő nehézségekkel jár. Ezért a 2 GHz körüli, átmeneti frekvenciasávban való üzemeltetés céljára kifejlesztettünk egy, úgynevezett kvázi koncentrált paraméteres módszert. E módszer lényege, hogy az (1) egyenlet által adott, a rezonanciához szükséges átmérőjűnél sokkal kisebb átmérőjű ferritárcsát alkalmazunk és a rezonancia feltételt — általában nagy relatív permittivitású dielektrikum alkalmazásával — kapacitív terheléssel biztosítjuk. [9]

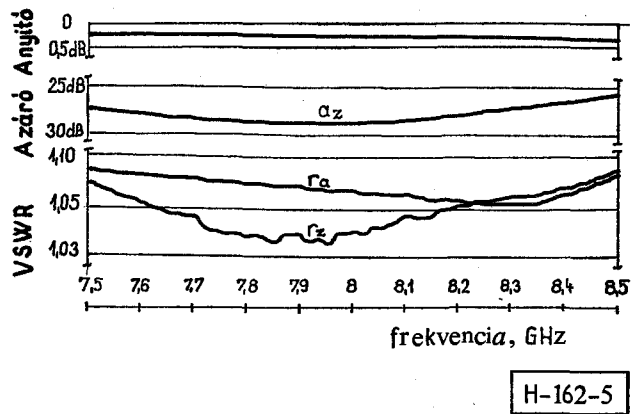
A koncentrált paraméteres és mikrosztripp cirkulá-



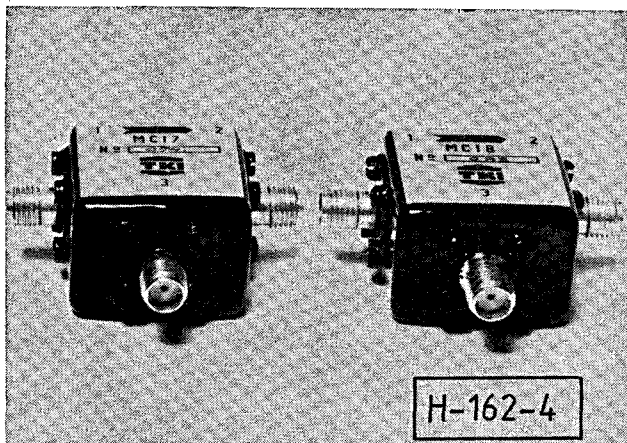
2. ábra. A giromágneses háromszög alapú hasáb zavaró módusait kiszűrő fémlemez elhelyezése



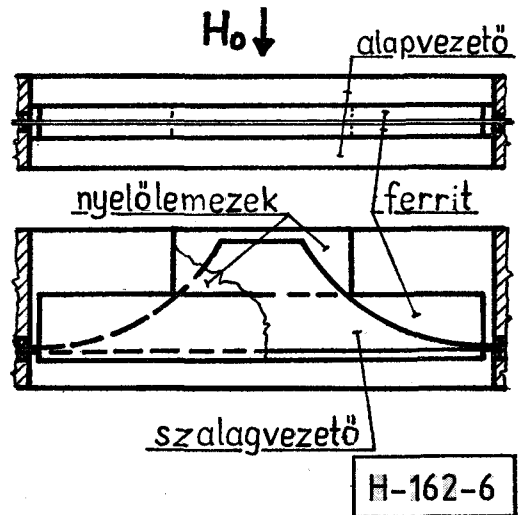
3. ábra. Egy-egy 7 és 8 GHz-es beültethető MIC izolátor fényképe



5. ábra. Egy 8 GHz-es MIC izolátor jelleggörbéi



4. ábra. Egy-egy 7 és 8 GHz-es dobozolt MIC cirkulátor fényképe



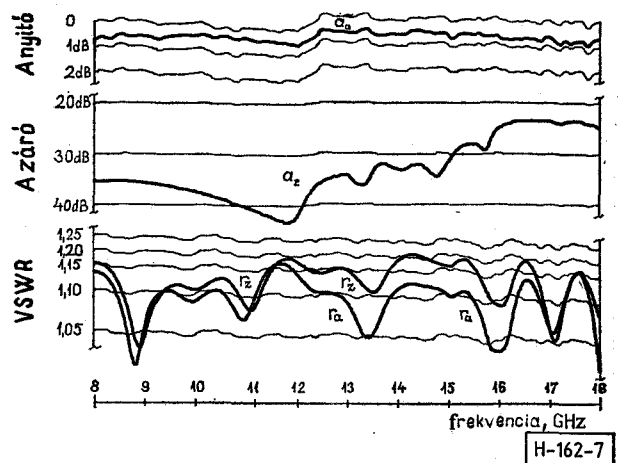
6. ábra. Egy élmódusú izolátor-elrendezés

torokat integrálható és SMA csatlakozókkal ellátott, dobozolt kivitelben készítjük a 100 MHz-tól 18 GHz-ig terjedő frekvenciatartományban. A cirkulátorok egyik kapujának illesztett lezárásával készítjük a koaxiális csatlakozós, illetve (az egyre növekvő igények szerint) a beültethető izolátorokat a cirkulátorokhoz hasonló műszaki adatokkal, tipikusan 0,5 dB-és átérésztőirányú, 20 dB feletti záróirányú csillapítással és 1,2 körüli FÁHA-nyal.

Egy-egy 7 és 8 GHz-es beültethető izolátor, ill. dobozolt cirkulátor fényképe látható a 3., ill. 4. ábrán. Az 5. ábrán pedig egy 8 GHz-es izolátor jelleggörbéit láthatjuk.

Legújabb fejlesztéseinkben az úgynevezett élmódusú eszközökkel foglalkozunk, amelyek működési alapját az elektromágneses tér nonreciprok — a két ellentétes hullám terjedési irányban különböző — téreloszlása nyújtja. Egy kiszélesedő szalagvonalban terjedő elektromágneses tér — megfelelő feltételek, negatív μ_{eff} értékek esetén — az egyik irányban haladó hullám esetén a szalagvonal egyik, a másik irányban való terjedés esetén a másik éle mentén koncentrálódik. Az egyik él mentén veszteséges közeget elhelyezve, az egyik irányban sokat, a másik irányban keveset csillapító elrendezést: izolátort kapunk.

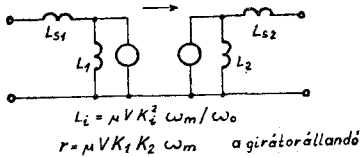
Egy ilyen élmódusú izolátor képét láthatjuk a 6. ábrán és jelleggörbéit a 7. ábrán.



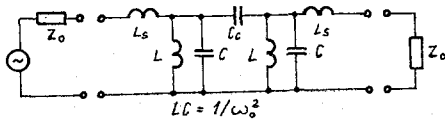
7. ábra. Egy élmódusú izolátor jelleggörbéi

Gíromágneses (YIG) szűrők és oszcillátorok kutatása, fejlesztése

Az Intézetben a YIG eszközfejlesztés és kissorozat-készítés teljes technológiai vertikumát kialakítottuk. Ennek megfelelően a YIG egykristályok előállítására, megmunkálására, minősítésére, orientálására, valamint a



a./ Hurokcsatolású YIG rezonátor helyettesítő képe



b./ Kétkörös YIG szűrő helyettesítő képe

H-162-8

8. ábra

- a) Hurokcsatolású YIG rezonátor helyettesítő képe
- b) Kétkörös YIG szűrő helyettesítő képe

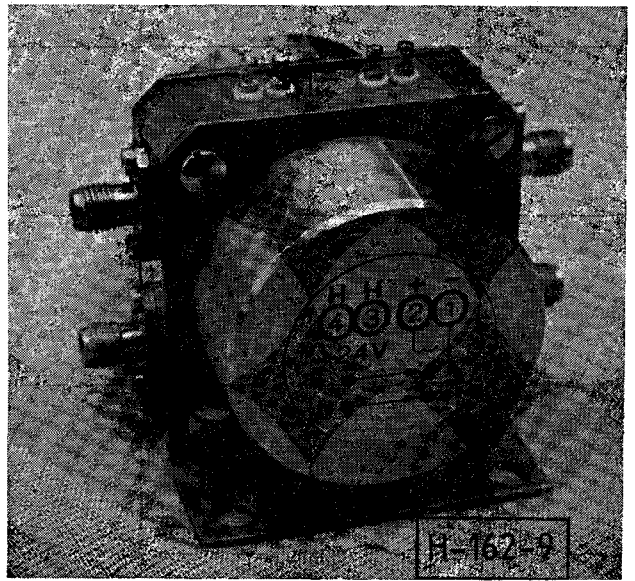
YIG eszközök (szűrők, oszcillátorok) kutatása, fejlesztése konstrukciós kialakítása és kissorozatú készítése is itt történik.

A YIG YIG tervezés és konstrukciókialakítás, valamint a szűrők kivitelezéséhez szükséges technológiák megvalósítása terén a következő eredményeket értük el:

A hurok csatolású YIG szűrők mikrohullámú modelljét finomítottuk. A 8. ábra mutatja a girátoros helyettesítő képet, valamint annak tovább bontott változatát kétkörös szűrő esetére [11], [12]. Ezt a modellt kiegészítettük a saját konstrukciós megoldásra jellemző korrekciós értékekkel. A szűrő átviteli görbéjét, reflexiós tényezőjét erősen befolyásolják a hurok és a ki- és bemenő kapuk közötti tápvonalszakaszok impedanciái, a hurok készítéséhez használt huzal átmérője, a csatoló-rendszert körülvevő rádiófrekvenciás térre vonatkozó határfeltételek és a giromágneses gömbátmérő/hurokátmérő viszony helyes megválasztása. A zárósávi (giromágneses rezonancián kívüli) csillapítás értéke 30—80 dB között változhat a konstrukció függvényében, de ezt az értéket a magnetosztikus módusok jelentősen ronthatják. Két típusuk van, frekvencia független és frekvenciafüggő, ún. vándorló módusok. Az előzőek a zárósávi csillapítást csökkentik diszkrét frekvencia tartományban, az utóbbiak pedig végigvonulva a rezonancia görbén az áteresztősáv egyenletességét zavarják meg jelentősen. A módusok amplitúdójának csökkentését sikerült elérni a YIG gömbök telítési mágneszettség értékének megfelelő megválasztásával és ún. kettős csatolóhurok alkalmazásával [13].

Kétszer kétkörös YIG szűrőket fejlesztettünk ki, melyek oktáv frekvencia tartományban hangolhatók 0,5 GHz—12,4 GHz-ig. A szűrők áteresztősávi csillapítása < 4 dB, zárósávi csillapítása > 50 db, állóhullám-arány < 2, a zavaró módusok szintje 20—25 dB-el alacsonyabb, mint az áteresztősávé. A hangolási meredekség: 16 ± 2 MHz/ mA, a működési hőfok-tartomány: $-10^\circ\text{C} - +65^\circ\text{C}$. Fenti paraméterek azonosak a nemzetközileg ismert intézetek hasonló célra készült szűrőivel. Egy YIG szűrő képét a 9. ábra mutatja.

YIG hangolású oszcillátorok kutatása, fejlesztése és kis-darabszámú készítése is folyik az Intézetben.



9. ábra. Egy YIG szűrő képe

A 0,9—2,1 GHz és 2—4 GHz frekvenciatartomány kifejlesztett oszcillátorok paraméterei nemzetközi szintűek.

A YIG eszközök legújabb családját a YIG filmeket tartalmazó szűrők, oszcillátorok, késleltető vonalak jelentik. Ezen eszközök a vékonyréteg YIG filmekben létrejövő felületi magnetosztikus hullámokat, vagy az előre, illetve hátra haladó térfogati magnetosztikus hullámokat hasznosítják. Jelentős kutató tevékenység folyik napjainkban a világ különböző laboratóriumai-ban, hogy újabb és jobb paraméterekkel rendelkező eszközöket állítsanak elő. Az eszközök igen jelentős szerepet töltenek majd be viszonylag rövid időn belül, mivel előállítási technológiájuk a mikroelektronikai technológiákkal ekvivalens, azaz nagy sorozatú, jó kihozatalú termelést tesz lehetővé.

Az intézetben elkezdtük a fejlesztő munkát ezen perspektivikusnak látszó eszközök kutatására, fejlesztésére [14]. Az első áramköri modellkísérletek már megtörténtek.

Giromágneses anyagok minősítő méréseinek kutatása, fejlesztése

Az Intézetben a giromágneses anyagok és eszközök kidolgozásával egy időben megkezdődött a fejlesztő tevékenység a megfelelő anyagparaméter-mérések megvalósítására. E munka során mérőrendszerek és műszerek kerültek kifejlesztésre és megvalósításra, melyek legtöbbje ma is üzemel és a nemzetközi színvonalnak megfelelő pontosságú. E fejlesztőtevékenység során a polikristályos ferrit- és gránátanyagok, valamint YIG egykristályok felhasználás szempontjából fontos paramétereinek mérése vált lehetővé.

A telítési mágneszettség mérésére mágneses ingát használunk, melynek pontossága az elektronikus vezérlő-és időmérő rendszer segítségével eléri a nemzetközileg használt ún. Fohner-típusú, vibráló mintás magnetométerét. A beépített hűtő-fűtő rendszer segítségével a telítési mágneszettség hőfokfüggését és a Curie-pontot is lehet vele mérni.

A mágneses tulajdonságok, azaz rezonanciavonalszélesség (ΔH), rezonanciától távoli veszteségek és a velük kapcsolatban levő ΔH_{eff} érték polikristályos anyagoknál; a rezonancia-vonalszélesség (ΔH_0) és anizotrópia konstans (K_1/M_s) egykristályoknál, valamint a dielektromos tulajdonságok (s és $tg\delta$) mérése a mikrohullámú frekvenciatartományban történik.

Polikristályos anyagok rezonancia-vonalszélesség-mérését IEC-ajánlás alapján valósítottuk meg, és pontossága jobb mint $\pm 5\%$ [15].

A giromágneses rezonanciától távoli veszteségek mérésére félautomatikus mérőrendszert fejlesztettünk ki a 6 GHz-es frekvenciatartományban. Pontossága $\pm 10\%$, ΔH_{eff} értékre vonatkoztatva [16]. A mérést a nagy jósági tényezőjű TE_{102} üregrezonátor és az automatikus szabályozórendszer teszi megfelelően érzékenyvé.

MIC-áramkörök gránáthordozói mágneses és dielektromos paramétereinek mérését egy, az X sávban megvalósított mérőrendszer teszi lehetővé. A négy-szög keresztmetszetű üregrezonátor paramétereinek a minta hatására történő megváltozását egzakt megoldásokon alapuló formulákkal követjük nyomon, melyekből a keresett paraméterek a szukcesszív approximációt alkalmazva meghatározhatók [17].

A dielektromos tulajdonságok mérését az X sávban felépített, viszonylag egyszerű mérőrendszerrel végezzük.

A mikrohullámú mérőüreg négy-szög keresztmetszetű, és ún. „módosított” perturbációs formulákat használunk a paraméterek mérési eredményekből történő számítására [18].

A mérés pontossága $\pm 1,5\%$ ϵ mérésekor és $\pm 15\%$ $tg\delta$ mérésekor, ha $tg\delta > 10^{-3}$.

Jelenleg folyamatban van egy nagy érzékenységgű ϵ és $tg\delta$ mérő rendszer fejlesztése, IEC-ajánlás alapján, szintén az X frekvenciasávban.

Gránát egykristályok rezonancia-vonalszélességének és anizotrópiaállandójának mérésére egy, a 9 GHz-frekvencia-tartományban üzemelő, szintén az intézetben kifejlesztett ún. FMR mérőrendszer szolgál [19].

A mérőrendszer rövidrezárt mérővonalial működik, és megfelelő mintatartó és mintaforgató rendszert tartalmaz. Pontossága rezonancia-vonalszélesség mérésekor $\pm 10\%$ vagy ± 4 A/m, míg anizotrópia konstans mérésekor $\pm 5\%$.

A rendszer lehetővé teszi a magnetoelasztikus konstans mérését és meghatározását is.

A jövőben a „hagyományos” ferrites eszközök és anyagok paramétere javításán, a működési frekvenciatartomány kiterjesztésén kívül a mm-es hullámsávú eszközök és a hozzájuk nélkülözhetetlen hexagonális szerkezetű mikrohullámú ferritek kutatásával, fejlesztésével, a magnetosztatikus felületi hullámok non-reciprok és mágneses térrel vezérelhető terjedésén alapuló eszközökkel (fázistolók, szűrők stb.), az optikai hírközlésben alkalmazható magnetooptikai eszközök kutatásával, fejlesztésével kívánunk foglalkozni.

Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton is ki kívánja fejezni köszönetét dr. Tardos Lászlónénak a ferritanyagokról szóló rész-

hez, dr. Csaba Istvánnak a YIG szűrőkről és az anyagmérésekről szóló részhez nyújtott segítségükért, Gyúri Pálnak az élmódusú izolátorok terén elért, még publikálatlan fejlesztési eredményei rendelkezésre bocsátásáért, valamint sok más kollégának a ferrites eszközök és anyagok terén az intézet számára végzett kutató-fejlesztő munkájáért.

IRODALOM

- [1] Dr. Csurgay Árpád—Markó Szilárd: Mikrohullámú paszszív hálózatok, Tankönyvkiadó, 1965.
- [2] Dr. Atmásky György: Mikrohullámú kézikönyv. IV. fejezet (Markó Szilárd), Műszaki Könyvkiadó, 1973.
- [3] E. Sterk, M. Balla, A. Sztaniszláv, M. Tardos: "Influence of Presintering on Chemical and Morphological Homogeneity". Journal of Magnetism and Magnetic Materials 41 pp. 69—72 (1984)
- [4] E. Beregi, J. Sztatisz, S. Gál: «Izpolzovanie Metoda DGT (M) dija Izmerenija Temperaturi Curie Nekotorich Magnitnich Materialov» Acta. Phys. Acad. Hung. 47 pp. 255—261 (1979)
- [5] E. Beregi, J. Sztatisz, E. Hild, A. Sztaniszláv, Gy. Rudnay: "Investigation of Solid State Reaction in $3 Y_2O_3:Fe_2O_3$ by DTG(M), X-Ray and IR Spectroscopic Methods" Journal of Magnetism and Magnetic Materials 41 pp 73—74 (1984)
- [6] M. Balla, E. Sterk, M. Tardos: "The Néel-point Behaviour in Vicinity of Stoichiometry" Journal of Magnetism and Magnetic Materials 19. pp. 123—125, 1980
- [7] Radványiné Sárközy Klára: Csótápvonalas cirkulátorok sávszélesség-növelésének néhány problémája. TKI-évkönyv, 1975.
- [8] Dr. Bársony Péter: Method for Analysing the Constituent Resonators of Circulators, 7th Colloquium on Microwave Communication, Budapest, 1982.
- [9] Bársony P., Enzsöl Gy., Markó Sz.: Strip-line and Microstrip Circulators with Reduced Sizes. 4th International Symposium on Radioelectronics. Varna, 1970.
- [10] Markó Szilárd: Application of Variational Technique for Waveguides Containing Gyromagnetic Medium. Előadás a III. Nemzetközi Mikrohullámú Ferrit Konferencián, 1976.
- [11] Dr. Csaba I., Gerencsér A., dr. Kálmán L., Szentmiklósi L.: YIG hangolású eszközök tervezése és készítési eredményei. Alkatrész-Szeminárium előadás, Siófok, 1984.
- [12] Gerencsér A., dr. Kálmán L., Kusztor L., Tóth Z.: Hurkos csatolású YIG rezonátorokkal készült mikrohullámú eszközök tervezésének néhány problémája. Mikrohullámú szeminárium előadás, Budapest, 1985.
- [13] Dr. Csaba I., Tóth Z.: YIG szűrők konstrukciós kialakítását befolyásoló tényezők. TKI Jubileumi Tudományos Konf. előadás 1985.
- [14] Gerencsér A., dr. Kálmán L.: Magnetosztatikus hullámok alkalmazása vékonyréteg YIG eszközökben. TKI Jubileumi Tudományos Konf. poszter 1985.
- [15] Csaba I.: Giromágneses anyagok rezonancia-vonalszélességének mérése. TKI Közlemények. 1981. 2. szám.
- [16] I. Csaba: Measuring possibilities of resonance losses on gyromagnetic materials. 3th National Summer School on Microwave Physics and Engineering Varna, Bulgaria — 1983.
- [17] L. Gal: Izmerenie elektromagnitnih parametrov ferritovuh podlosek dija integralnih hem SzVCs. 4th ICMF Konferencia, Varna, Bulgária 1982.
- [18] I. Csaba: Simple method of measuring the dielectric properties of gyromagnetic materials. 3th Int. Conf. on Ferrimagnetic Materials. Jablonna, Lengyel. 1978.
- [19] Csaba I.: Gránát egykristályok mikrohullámú tulajdonságai és anyagparamétereinek mikrohullámú mérés technikája. Híradástechnika, 1985. 7. szám.